

Innowacyjna metoda ciągłego pomiaru odkształceń ściany osłonowej aluminiowo-szklanej oraz opracowanie doświadczalno-numerycznej metody analizy stanu naprężeń w konstrukcji

Monitoring of strain and deformations analysis of aluminum-glass curtain walls: an innovative experimental-numerical approach

mgr inż. Dawid Rusin (ORCID: 0000-0001-6311-3991), Politechnika Krakowska, Aluprof S.A.,
dr hab. inż. Janusz Juraszek, prof. UBB (ORCID: 0000-0003-3771-2776),
Uniwersytet Bielsko-Bialski

DOI: 10.5604/01.3001.0054.4875

Streszczenie: W artykule przedstawiono nowatorską metodologię badań oraz monitoringu fasad aluminiowych z wykorzystaniem światłowodowych czujników odkształceń FBG (*Fiber Bragg Grating*) w budynkach wysokościowych HRB (*High-Rise Building*). Celem jest wyznaczenie rzeczywistego oddziaływania wiatru na te konstrukcje. Zaproponowane rozwiązania pozwalają na dokładniejsze i bardziej szczegółowe pomiary odkształceń i ugięć niż tradycyjne. Umożliwiają ich monitorowanie nieprzerwanie w długim czasie – dzięki temu możliwe będzie optymalizowanie konstrukcji fasady pod kątem bezpieczeństwa i wpływu na środowisko, a także sprawdzenia jej stanu technicznego. Metoda ta zostanie zastosowana do badań fasady elementowej MB-SE65 firmy Aluprof S.A. Wyniki badań i analiz umożliwią opracowanie nowych wytycznych projektowania fasad aluminiowych. Przedstawiona metodologia ma duży potencjał i może być wykorzystana do badań innych typów konstrukcji aluminiowych.

Słowa kluczowe: fasada aluminiowa, czujniki FBG, obciążenie wiatrowe, monitoring konstrukcji.

Abstract: The article presents a novel methodology for research and monitoring of aluminium facades using FBG (*Fiber Bragg Grating*) optical strain sensors in high-rise buildings (HRB). The aim is to determine the real impact of wind on these structures. The proposed solutions allow for more accurate and detailed measurements of deformations and deflections than traditional methods. They enable continuous monitoring over long periods of time. This will allow for the optimization of facade design in terms of safety and environmental impact, as well as to verify its technical condition. The method will be applied to the research of the MB-SE65 element facade by Aluprof S.A. The results of the research and analysis will allow for the development of new guidelines for the design of aluminium facades. The presented methodology has a high potential and can be used for research on other types of aluminium structures.

Keywords: aluminum facade, FBG sensors, wind load, structural health monitoring.

1. Wprowadzenie

Współczesna architektura wielkich miast opiera się na wzrośnięciu biurowców i kompleksów mieszkalno-usługowych. Dominują w niej konstrukcje o znacznej wysokości, z dużą liczbą przeszkleń i ograniczonym wykorzystaniem ścian z cegły czy też betonu (rys. 1) [1]. W odpowiedzi na te trendy dostawcy rozwiązań fasadowych oferują ściany aluminiowo-szklane typu słupowo-ryglowego oraz elementowego. Ściany te, poddane obciążeniu wiatrowemu, odkształcają się, a ugięcia ich profili można mierzyć za pomocą technologii światłowodowej (czujników FBG – *Fiber Bragg Grating*).

Zarejestrowane wartości można zadać jako warunki brzegowe w symulacji MES (Metoda Elementów Skończonych), co umożliwi wyznaczenie rzeczywistego oddziaływania wiatru na konstrukcje aluminiowe. Dodatkowo celem jest opracowanie systemu, którego zadaniem będzie stałe rejestrowanie odkształceń i naprężeń w warunkach rzeczywistych w długim okresie czasu. Docelowo system zostanie zastosowany na budynku HRB (*High-Rise Building*), którego fasada zostanie wykonana na bazie ściany MB-SE65. Przewiduje się, że będzie to budynek w jednym z dużych europejskich miast (np. Londyn, Warszawa, Wilno, Oslo) lub też w USA (Nowy Jork).



Rys. 1. Przykład nowoczesnej elewacji – budynek.KTW w Katowicach, fasada: MB-SE85 SG firmy Aluprof S.A.

2. Aluminium jako materiał konstrukcyjny profili fasadowych

Tworzenie konstrukcji fasadowych wykonanych z aluminium ma szereg zalet. Są to m.in.: nowoczesny wygląd obiektów budowlanych, komfort cieplny oraz oświetleniowy ich użytkowników wynikający z większego udziału elementów przezziernych w ścianach, prosty i szybki proces montażu czy brak potrzeby konserwacji aluminiowych profili [2]. Profile te, wykonane ze stopu EN AW-6060 (PN-EN 573-3) w stanie T66 (PN-EN 755-2), cechują się niewielką masą przy wysokiej wytrzymałości na rozciąganie. Dużą zaletą jest możliwość ich wielokrotnego recyklingu [3], co jest ideą gospodarki obiegu zamkniętego realizowanego przez Grupę Kęty S.A. przy produkcji swoich profili aluminiowych. Dodatkowo obróbka kształowników, taka jak frezowanie czy też wiercenie otworów pod akcesoria typu łączniki, okucia czy stabilizatory jest o wiele łatwiejsza i tańsza niż obróbka profili stalowych. Ściana wykonana z aluminium charakteryzuje się mniejszą sztywnością niż wspomniane wcześniej tradycyjne ściany wykonane z cegieł lub betonu. W dziale 4.1 normy PN-EN 13830 zamieszczony jest wymóg dotyczący maksymalnego dopuszczalnego ugięcia elementów poziomych (rygli) oraz pionowych (słupów) profili fasad aluminiowych obciążonych wiatrem – nie może ono przekraczać wartości $L/200$ (gdzie L to odległość pomiędzy punktami zakotwienia profilu do konstrukcji budynku) lub 15 mm. Narzuca to inżynierom konieczność konstruowania kształowników posiadających odpowiednią wartość momentu bezwładności, co polega na zaprojektowaniu optymalnego kształtu profili oraz grubości ich ścianek. Profile te są elementami cienkościennymi, w których występują naprężenia styczne mogące powodować deformację



Rys. 2. Przykład komory badawczej w badaniu polowym, źródło: <https://badaniaokien.pl/business-garden-wroclaw/>

i lokalną utratę stateczności ścianki. Należy pamiętać, że norma PN-EN 1999-1-1 „Projektowanie konstrukcji aluminiowych – Reguły ogólne” nie zawiera wymagań dotyczących kształowników cienkościennych, dlatego przy sprawdzaniu SGU (Stanów Granicznych Użytkowalności) i SGN (Stanów Granicznych Nośności) należy posługiwać się dodatkowymi normami wyrobu, które zawierają bardziej restrykcyjne wymagania [3].

3. Badania laboratoryjne oraz polowe

Poprawność obliczeń ugięcia profili sprawdza się doświadczalnie podczas badań laboratoryjnych opisanych w normach [4–5] oraz badań polowych prowadzonych na rzeczywistej konstrukcji. Badania te dają jednak ograniczony obraz ugięć elementów ściany poddanej obciążeniu wiatrowemu. Zazwyczaj mierzy się odkształcenie najbardziej obciążonego profilu. Praca [1] opisująca porównanie wyników badania laboratoryjnego aluminiowej fasady słupowo-ryglowej, przeprowadzonego zgodnie z wymaganiami norm [4–5] z wynikami symulacji MES tej konstrukcji stwierdza, że dla możliwie najlepszego odwzorowania rzeczywistości w symulacji jest potrzebna większa liczba punktów pomiarowych niż ma to zazwyczaj miejsce. Obecnie pomiary są realizowane za pomocą mechanicznych czujników przemieszczeń, które generują szereg błędów i trudności technicznych. Z kolei w badaniach polowych mierzenie ugięć profili jest mocno utrudnione ze względu na ograniczone możliwości stworzenia komory ciśnieniowej (rys. 2). W celu precyzyjnego i niezakłóconego przez czynniki zewnętrzne wyznaczenia wpływu oddziaływania wiatru (różnicy ciśnienia pomiędzy częścią wewnętrzną i zewnętrzną budynku) na konstrukcje proponuje się zastosowanie światłowodowych czujników odkształceń FBG. Ich kompaktowe wymiary i prosty montaż (klejenie lub przykręcanie do badanych profili) znacznie zwiększają dokładność pomiarów, ograniczają możliwość popełnienia błędu pomiarowego oraz zwiększają komfort pracy ekipy laboratorium badawczego lub obsługi budynku.

4. Czujniki FBG

Analiza literatury oraz rynku technologii pomiarowych, a także doświadczenie autorów artykułu sugerują, że czujniki FBG mają szereg zalet w porównaniu z klasycznymi metodami pomiarowymi. Wyróżniają się wysoką dokładnością pomiarową, możliwością rejestrowania wyników z dużą częstotliwością 20 kHz pozwalającą na wykonywanie pomiarów dynamicznych i znaczną stabilnością pomiarową w długich okresach obserwacyjnych. Ponadto ważnymi cechami czujników FBG są także:

niska masa (przekłada się to na brak zaburzenia pomiaru poprzez dociążenie/dosztywnienie badanego elementu czujnikiem), wysoka czułość i przede wszystkim odporność na zakłócenia elektromagnetyczne [6]. Czujniki te są odporne na korozję, ponieważ nie zawierają elementów stalowych (w przeciwieństwie do tensometrów elektrooporowych), które to w kontakcie z aluminiowymi komponentami fasady mogłyby doprowadzić do ich lokalnej korozji. Również brak potrzeby kalibracji wtórnej omawianych czujników FBG wydaje się być mocną przesłanką do ich stosowania zarówno przy krótkich, jak i długoterminowych pomiarach fasad wykonanych z aluminium [7]. Wartością dodaną jest również fakt, że czujniki FBG mogą także prowadzić pomiary innych parametrów, takich jak np. temperatura badanego elementu, przyspieszenie, przemieszczenie oraz wilgotność.



Rys. 3. Stanowisko do kalibracji czujników FBG na maszynie wytrzymałościowej



Rys. 4. Czujnik FBG (wraz z mechanicznym czujnikiem przemieszczenia) przyklejony do profilu wycinka fasady zamontowanego w komorze badawczej

5. Metodyka pomiarów

Nowa opracowywana metoda pomiarowa opiera się na stosowaniu skalibrowanych laboratoryjnie czujników FBG. Przejście z pomiaru odkształceń w danym miejscu profilu na jego ugięcie można zrealizować na dwa sposoby. Pierwszy z nich to proces z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej. Polega on na przyklejeniu czujnika FBG do profilu aluminiowego o określonej długości L . W miejscu czujnika FBG przykładana jest mechaniczna miernik przemieszczenia. Następnie profil obciąża się na maszynie wytrzymałościowej znaną siłą z równoczesną rejestracją wartości odkształcenia w ustrainach z czujnika FBG oraz wartości pokazywanych przez tradycyjny czujnik przemieszczenia (rys. 3). Wartości te zestawia się ze sobą, dzięki czemu wiadomo, jakie jest ugięcie profilu przy określonej wartości odkształcenia (czujnik FBG).

Druga metoda polega na użyciu pełnowymiarowego modelu fasady zamontowanego w komorze ciśnieniowej. Podobnie jak w pierwszej, czujniki FBG przykleja się do profilu, a mechaniczne urządzenia pomiarowe przykładają się do nich niewielkiej odległości



Rys. 5. Komora do badań fasad, okien i drzwi w CBiR Aluprof S.A.

(rys. 4). Ugięcie profilu uzyskuje się poprzez wywołanie nadciśnienia lub podciśnienia w komorze badawczej, której jedną ze ścian jest badana fasada. Symuluje to rzeczywiste warunki obciążenia wiatrowego oddziaływujące na konstrukcję aluminiową. Czujniki skalibrowane w ten sposób mogą być bez żadnych dodatkowych obliczeń stosowane na budynku, dla którego dana fasada jest przeznaczona.

Oczywiste jest, że lepszym sposobem kalibracji jest ten z wykorzystaniem pełnowymiarowego modelu badawczego, jednak nie zawsze jest możliwość, czy też potrzeba jego wykonania i przeprowadzenia badań.

6. Symulacje numeryczne MES

Badanie laboratoryjne wspomnianego modelu, który jest wycinkiem w pełni odwzorowującym ustrój zamontowany na budynku, propaguje quasi-rzeczywiste wyniki odkształcenia fasady. Opisana metodologia zostanie zastosowana podczas badań laboratoryjnych nowej fasady elementowej MB-SE65 firmy Aluprof S.A. Jako że firma posiada własne Centrum Badań i Innowacji (CBI) (rys. 5) wyposażone w jedną z największych w tej części Europy komorę do badań fasad (modele 10x10 m), okien i drzwi, ma możliwość ich przeprowadzenia we własnym zakresie. Dodatkowo we własnym zakładzie produkcyjnym jest w stanie dokonać w pełni nadzorowanej fabrykacji modelu badawczego, a następnie jego montażu w komorze badawczej. Wyniki ugięć zarejestrowane za pomocą opisanych czujników FBG z tego badania będą zaimplementowane

do modelu MES jako warunki brzegowe. Pierwsze symulacje numeryczne MES/FEM dla ściany osłonowej MB-SR50N HI przedstawiono w pracy [1]. Model fasady elementowej MB-SE65 będzie składał się z kompletnych segmentów, wyposażonych we wszystkie łączniki, wsporniki, szyby, uszczelki itp. Jest to nowatorskie podejście względem tradycyjnej metody obliczeniowej, polegającej na kalkulacjach opartych o modele prętowe 1D. Model MES będzie modelem bryłowym 3D wykonanym w programie ABAQUS. Opisywana metoda pozwoli na uzyskanie rzeczywistych wartości naprężeń w elementach konstrukcyjnych fasady, co może dostarczyć danych na temat możliwych modyfikacji kolejnych fasad firmy Aluprof S.A. Ich celem będzie zwiększenie bezpieczeństwa użytkowania produktów oraz ich mniejsze oddziaływanie na środowisko.

7. Ciągły pomiar odkształceń

Planuje się zaprojektowanie specjalnego systemu ciągłego monitoringu fasady zainstalowanej na budynku HRB. System będzie się składał m.in. z opisanych czujników FBG, interrogatora optycznego, komputera rejestrującego parametry, który będzie zapisywał na dysku lub wysyłał wyniki w czasie rzeczywistym do dedykowanego serwera oraz ze stacji pogodowej, której zadaniem będzie zapis warunków atmosferycznych takich jak prędkość wiatru, ciśnienie, temperatura itd.

8. Podsumowanie

Firma Aluprof S.A. wyznaczając sobie za cel innowacyjność, bezpieczeństwo użytkowania swoich ścian aluminiowo-szklanych oraz ograniczenie śladu węglowego powodowanego ich wytworzeniem wprowadziła implementację technologii światłowodowej do nowej fasady elementowej MB-SE65. Zebrane dane posłużą do udoskonalenia metod projektowania fasad aluminiowo-szklanych. Badania prowadzone są na podstawie umowy trójstronnej podpisanej pomiędzy Ministerstwem Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Politechniką Krakowską i Aluprof S.A. w ramach doktoratu wdrożeniowego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Juraszek J., Woźniczka P., Rusin D., Badania eksperymentalne i symulacje komputerowe ściany osłonowej MB-SR50N HI obciążonej wiatrem, *Materiały Budowlane* 9/2022, str. 53–55, doi: 10.15199/33.2022.09.04
- [2] Górka M., Leśniak A., Systemy fasad aluminiowo-szklanych i ich ocena wielokryterialna, *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej* 24(2018), str. 102–107, doi: 10.17512/znb.2018.1.16
- [3] Kozicka E., Kukawska E., Klaudia R., *Fasady Aluminiowe w Eurokodzie* 9, *Builder* 6/2019, str. 106–111, doi: 10.5604/01.3001.0013.2039
- [4] PN-EN 13830: Ściany osłonowe. Norma wyrobu
- [5] PN-EN 12179: Ściany osłonowe. Odporność na obciążenie wiatrem. Metoda badania
- [6] Sun L., Li C., Zhang C., Liang T., Zhao Z., The strain transfer mechanism of fiber bragg grating sensor for extra large strain monitoring, *Sensors (Basel, Switzerland)* 19(8)2019, str. 1851, doi: 10.3390/s1908.1851
- [7] Donghua Xu, Yongxiang Wang, Jingfeng Xie, Monitoring and Analysis of Building Curtain Wall Deformation Based on Optical Fiber Sensing Technology, *Transactions of Civil Engineering*, 46(2022), str. 3081–3091, doi: 10.1007/s40996-021-00735-3

Konferencja Naukowo-Techniczna KS 2024 KONSTRUKCJE SPRĘŻONE Kraków, 13–14 maja 2024

TEMATYKA KONFERENCJI

Tematyka Konferencji obejmuje szeroki zakres zagadnień związanych z konstrukcjami sprężonymi, w szczególności:

- nowe rozwiązania konstrukcyjne w obiektach sprężonych,
- nowe materiały stosowane do sprężania konstrukcji,
- trwałość konstrukcji sprężonych,
- awarie, uszkodzenia i problemy użytkowe w konstrukcjach sprężonych,
- wzmacnianie konstrukcji przez sprężenie,
- przykłady realizacji konstrukcji sprężonych,
- modelowanie obiektów sprężonych,
- stany graniczne w projektowaniu konstrukcji sprężonych,
- zagadnienia pracy konstrukcji sprężonych: betonowych, stalowych i innych,
- zagadnienia technologiczne w konstrukcjach sprężonych,
- projektowanie i wykonawstwo mostów podwieszonych i extradosed,
- przykłady realizacji konstrukcji ciągnowych.



ORGANIZATOR

Katedra Konstrukcji Żelbetowych i Sprężonych
Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej

KOMITET ORGANIZACYJNY

dr inż. Piotr Gwoździewicz (Przewodniczący)
dr hab. inż. Wit Derkowski, prof. PK (V-ce Przewodniczący)

Konferencji KS2024 towarzyszyć będą warsztaty „Dobre praktyki w projektowaniu konstrukcji sprężonych”.

Zajęcia prowadzone przez bardzo doświadczonych uczestników procesu budowlanego odbędą się 15.05.2024.



KATEDRA KONSTRUKCJI
ŻELBETOWYCH I SPRĘŻONYCH

KONTAKT

Katedra Konstrukcji Żelbetowych i Sprężonych
Politechnika Krakowska
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
tel/fax: (12) 628 20 27
e-mail: ks2024@pk.edu.pl
www.ks2024.pk.edu.pl